14 Außengeräusch

Das Fahrzeugaußengeräusch ist diejenige Fahrzeugeigenschaft, welche nicht nur für den Besitzer des Fahrzeugs selbst, sondern gleichermaßen für Passanten und Anwohner von Bedeutung ist. Die Palette der Geräuschphänomene reicht dabei vom Röhren eines abfahrenden Sportwagens, welche den Fahrzeugcharakter betonen soll, über die Belästigung, welche ein nagelndes Dieselfahrzeug im Stand bei Passanten hervorrufen kann, bis zu Aspekten der Verkehrssicherheit, welche mit der ausreichenden akustischen Wahrnehmbarkeit eines Fahrzeugs im Stadtverkehr verknüpft sind. Aufgrund seines akustischen Störpotentials ist das Außengeräusch auch die einzige vibroakustische Eigenschaft, für welche der Gesetzgeber Grenzwerte vorschreibt. Die Außengeräuschentwicklung von Fahrzeugen befasst sich daher mit den Themenfeldern

- Standgeräusch,
- Soundgestaltung beim Abfahren,
- gesetzlich limitiertes Vorbeifahrtgeräusch, und
- akustische Wahrnehmbarkeit im urbanen Bereich.

Alle diese Themen werden insbesondere auch vom sozialen Umfeld bewertet, so dass es im Interesse der Automobilindustrie liegt, durch das akustische Erscheinungsbild im Außengeräusch zugleich um soziale Akzeptanz als auch um Begeisterung für ihre Produkte zu werben.

14.1 Standgeräusch

Im Folgenden wird nur auf das Dieselstandgeräusch eingegangen, da hier insbesondere die Hersteller von Premium-Fahrzeugen aus Gründen des akustischen Erscheinungsbildes viel Aufwand treiben. Dieselmotoren sind in Europa auf dem Vormarsch. In Ländern wie Frankreich, Österreich oder Spanien beträgt der Dieselanteil an den PKW Neuzulassungen bis zu 60 %. In Deutschland stieg der Anteil in den letzten Jahren sprunghaft von 20 % auf 40 % an. Auch in USA und Asien wird für die Zukunft aufgrund der steigenden Kraftstoffpreise ein zunehmender Anteil an Dieselfahrzeugen prognostiziert. Gerade in diesen Ländern hat der Dieselmotor insbesondere aus akustischen Gründen Akzeptanzprobleme zu überwinden. Das mittelfristige Ziel wird daher für die Automobilindustrie sein, das Dieselfahrzeug auch geräuschlich auf das Niveau von Ottomotorfahrzeugen zu heben, um – zumal für Premiumfahrzeuge – einen gesamthaft stimmigen Auftritt sicherzustellen und auch bisherige Fahrer von Fahrzeugen mit Ottomotor zu überzeugen.

Bei der Entwicklung des Dieselstandgeräusches ist neben der in der Fahrzeugakustik üblichen spektralen Auswertung auch eine subjektive Bewertung erforderlich. Hier zielen neben der Systematisierung der Bewertungsmethoden neuere Forschungen auf die Objektivierung des subjektiven Höreindrucks ab. Dazu werden subjektive Beurteilungen durch Versuchspersonen zu physikalisch/psychoakustischen Auswertungen akustischer Signaldaten in Korrelation gesetzt. Eine instrumentelle Bewertung des Dieselnagelns durch einen Dieselnagelindex ermöglicht, Fahrzeuge und Motoren untereinander zu vergleichen und quantitative Zielwerte zu formulieren (Kapitel 7).

Der wesentliche Unterschied zwischen herkömmlichen Saugmotoren und Diesel- bzw. Ottodirekteinspritzern ist der höhere Einspritzdruck und beim Dieselmotor das doppelt so hohe Verdichtungsverhältnis. Wenige Mikrosekunden entscheiden hier über die Akustik. Während der Kolben sich auf dem Weg zum oberen Totpunkt (OT) bewegt, steigt der Zylinderdruck expotentiell an. Der Druckgradient zwischen Zündzeitpunkt und Druckmaximum regt den mittleren Frequenzbereich des emittierten Luftschalls an. Im Druckabklingen bilden sich Brennraumresonanzen aus, die wesentlich die höheren Frequenzen im Spektrum prägen (Kapitel 9.1). Ziel aus akustischer Sicht ist es, den Druckimpuls abzuschwächen. Dies kann durch neue Einspritztechnologien mit Piezoaktuatoren mittels mehrerer Piloteinspritzungen erreicht werden. Brennraumresonanzen lassen sich durch Nacheinspritzung von Kleinstmengen in den Brennraum beeinflussen. Beide Technologien laufen aber dem Ziel der Abgasemissionsreduktion zuwider. Hier hilft eine differenzierte, drehzahlabhängige Einspritzvorgabe, die speziell im Leerlauf für eine weichere Verbrennung sorgen kann. Weitere dieselspezifische Geräuschquellen sind die Hochdruckpumpen. Hier haben Reihenmotoren mit Common-Rail Technologie Vorteile. Sie benutzen nur eine Pumpe für alle Einspritzdüsen, während die Pumpe/Düse-Technik pro Zylinder eine Pumpe vorsieht.

Bei immer rigideren gesetzlichen Anforderungen bezüglich der Abgasemission ist der Spielraum für Akustikverbesserungen durch primäre Maßnahmen am Motor geringer geworden. Hier greifen zunehmend verschiedene passive Maßnahmen bei der Akustikoptimierung eines Fahrzeuges. Um die Standgeräuschqualität eines heutigen Dieselfahrzeugs der oberen Mittelklasse in der Subjektivbeurteilung auf das Niveau von Ottomotorfahrzeugen zu heben, wäre eine Pegelreduzierung um ca. 10 dB durch Sekundärmaßnahmen erforderlich (Patsouras et al., 2002). Übliche Kapselmaßnahmen sind im Bereich der Injektoren die Injektorabdeckung und die Motorhaube.

Im Bereich der Fahrzeugfront gilt der Einsatz von temperaturgesteuerten Klappen als Stand der Technik. Im Unterboden sind vor allem als Schallquellen die Ölwanne und das Getriebe, sowie Teile des Abgaskrümmers, des Partikelfilters und der weiterführenden Abgasanlage, sowie Leckagen des Motorraums durch Dämmungsmaßnahmen reduzierbar. Aus Gründen des Wärmemanagements sind der vollständigen Kapselung jedoch Grenzen gesetzt. Deshalb wird zusätzlich mit Absorptionsmaßnahmen im Motorraum, unter der Motorhaube und im Unterbodenbereich des Innenraums gearbeitet. Auch Absorptionsmaßnahmen auf der Außenfläche der Unterbodenverkleidungen und in den Radhäusern besitzen erhebliches Potential zur Verminderung des Standgeräusches.

Durch eine geschickte Kombination aus Dämmung und Absorption kann eine breitbandige Absenkung des Geräuschniveaus erreicht werden. Tieffrequente Schallanteile im Dieselgeräusch werden dabei durch Kapselmaßnahmen, wie Schilde, Vorsatzschalen und ähnliches, verringert. Hochfrequente Anteile lassen sich je nach Abstimmung des Absorbers durch ausgesuchte Absorbertechniken reduzieren **(Bild 14-1)**.

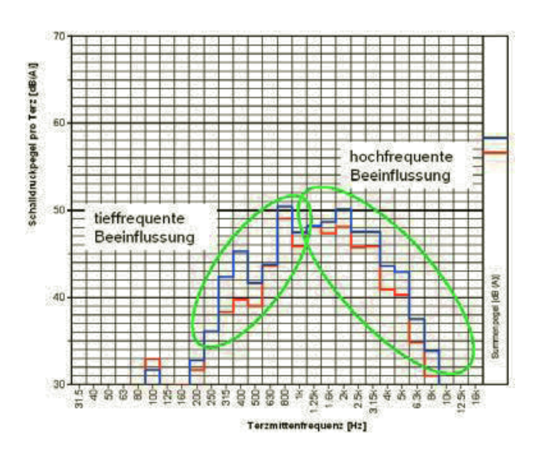


Bild 14-1: Beeinflussung des Standgeräusches durch Dämmungs- und Absorptionsmaßnahmen

Generell gilt aber, dass jede Dämmung das Schallproblem nur verschiebt. Nur durch gezielte Absorption wird lokal Schallenergie vernichtet. Dem Einsatz von herkömmlichen Absorbermaterialien sind durch Anforderungen an die Hitzebeständigkeit Grenzen gesetzt, da sie sich nicht nahe genug an die Schallquelle heranbringen lassen. Gerade bei dem immer kleiner werdenden Bauraum moderner Fahrzeuge gehen herkömmliche Absorber meist auf Konfliktkurs. Daher wird derzeit an akustisch wirksamen mikroperforierten Hitzeschilden gearbeitet, welche die Schallenergie direkt an der Quelle reduzieren (Kapitel 5.4.3).

14.2 Fahrgeräusche

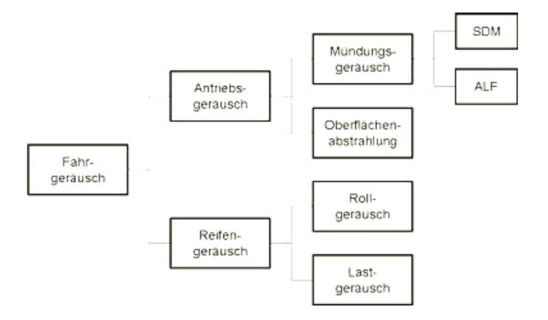


Bild 14-2: Übersicht der Teilschallquellen des Fahrgeräusches

Das Fahrgeräusch setzt sich im Wesentlichen aus den zwei Teilschallquellen Antriebsgeräusch und Reifen-Fahrbahngeräusch zusammen. Beim Antriebsgeräusch sind die Mündungsgeräusche von Schalldämpfer (SDM) und Ansauganlage (ALF) dominant. Die Oberflächenabstrahlung der Abgasanlage kann ebenfalls eine Rolle spielen. Das Reifen-Fahrbahngeräusch setzt sich aus einem Anteil Rollgeräusch und einem Lastanteil zusammen **(Bild 14-2)**.

Für eine erste Abschätzung kann das Reifengeräusch an jedem Radaufstandspunkt näherungsweise als breitbandige und inkohärente Monopolquelle betrachtet werden. Für jeden Einzelstrahler nimmt damit aufgrund der Kugelcharakteristik die Schallintensität bei der Vorbeifahrt mit dem Quadrat der Entfernung $r_{1,2}$ der Schallquellen vom Mikrofonpunkt ab. Für die Schallintensität ergibt sich damit in Abhängigkeit von der zurückgelegten Wegstrecke s folgende Beziehung:

$$\frac{I_{1,2}(s)}{I(s=0)} = \left(\frac{d}{r_{1,2}}\right)^2$$

mit

$$r_{1,2}^2 = \left(s - \frac{L}{2} \pm \frac{R}{2}\right)^2 + d^2$$

Aufgrund der Inkohärenz lässt sich die Schallintensität am Mikrofonpunkt aus der Summe der Einzelintensitäten bestimmen. Für das Antriebsgeräusch ist die Bedingung der Inkohärenz im Allgemeinen nicht erfüllt, da das Geräusch der Ansaug- und der Abgasmündung durch stark korrelierte Motorordnungen dominiert ist (Kapitel 10). Daher müssen für diesen Fall die Schalldrücke von Ansaug- und Abgasmündung phasenrichtig addiert werden. Unter der Annahme eines sinusförmigen Verlaufs des Schalldrucks gilt:

$$\frac{p(s)}{p(s=0)} = \frac{d}{r_{1,2}} \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_{1,2}}{c}\right)\right]$$

Die Kurven in **Bild 14-3** wurden mit folgenden Zahlenwerten ermittelt:

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Fahrzeuglänge	*L*	5	m
Achsabstand	*R*	3	m
Mikrofonabstand	*D*	6	m
Frequenz	*f*	100	Hz

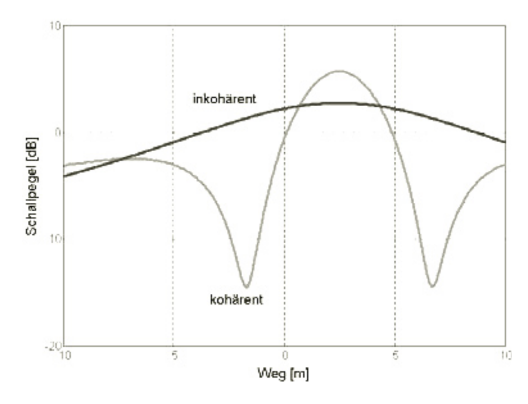


Bild 14-3: Relativer Schallpegel bezogen auf den Wert bei $s = 0$ für je zwei kohärente bzw. inkohärente Schallquellen

Aus dem Kurvenverlauf im oberen Bildteil ist ersichtlich, wie das Reifengeräusch aufgrund der inkohärenten Quellen gemäß dem Abstandsgesetz verläuft, während sich für das Antriebsgeräusch aufgrund der korreliert angenommenen Teilschallquellen deutliche Interferenzen ausbilden. In der Praxis fallen diese Interferenzen deutlich geringer aus, da nicht nur eine Frequenz emittiert wird und auch noch erhebliche unkorrelierte Geräuschanteile in den Teilschallquellen Ansaug- und Abgasmündung enthalten sind (**Bild 14-4**). Die Unsymmetrie in beiden Verläufen erklärt sich aus der Tatsache, dass der Weg *s* in Anlehnung an die ISO-Messvorschrift für die beschleunigte Vorbeifahrt (Kapitel 14.2.3) als Abstand der Fahrzeugfront zur Mikrofonlinie definiert wurde. Dadurch kommen die Schallquellen erst bei einem Weg von einer halben Fahrzeuglänge (s = 2,5m) symmetrisch zur Mikrofonlinie zu liegen.

In **Bild 14-4** sind die Pegelverläufe einer gemessenen beschleunigten Vorbeifahrt nach ISO 362 dargestellt. Der Verlauf des Reifengeräusches deckt sich qualitativ gut mit vorstehenden Betrachtungen. Das Motorgeräusch liegt bei Anfahrt mit geringer Last zunächst weit unter dem Reifengeräuschpegel. Bei s = –10 m gibt der Fahrer Vollgas, das Motorgeräusch steigt daraufhin deutlich über den Pegel des Reifengeräusches an. Die köhärenzbedingte Welligkeit ist bei diesem Beispiel nur schwach ausgeprägt.

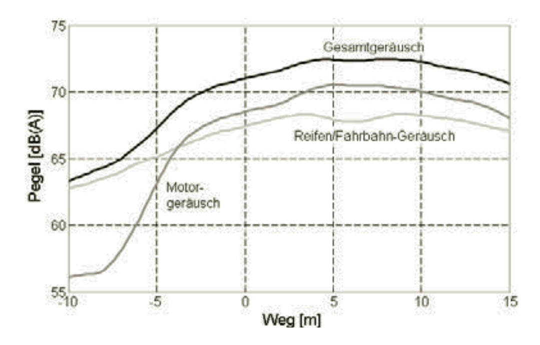


Bild 14-4: Teilschallquellen Antriebsgeräusch und Reifen-Fahrbahngeräusch in der beschleunigten Vorbeifahrt für ein sportliches Fahrzeug

Als Ausdruck des langjährigen Entwicklungsfortschrittes an den Aggregaten des Antriebsstranges zeigen sich die spektralen Anteile zweier vergleichbarer komfortorientierter Fahrzeuge mittlerweile deutlich verändert. Reduziert wurde vor allem die Oberflächenabstrahlung des Motor-Getriebeverbunds und das Mündungsgeräusch der Abgasanlage (**Bild 14-5**). Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch verbleibt in der Umgebung von 1 KHz als dominante Quelle und erschwert eine weitere Pegelabsenkung durch fahrzeugseitige Maßnahmen.

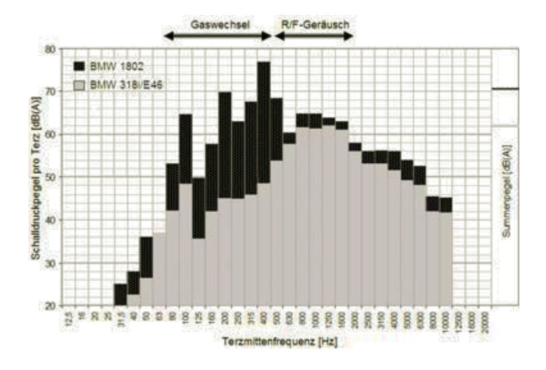


Bild 14-5: Vergleich der Spektren des maximalen Vorbeifahrgeräusches von zwei Mittelklasse-Limousinen früher und heute

14.2.1 Reifen/Fahrbahngeräusch

Das Reifen/Fahrbahn-Geräusch (RFG) tritt bereits ab ca. 30–40 km/h im urbanen Verkehr dominant in Erscheinung. Es spielt auch bei den gesetzlichen Grenzwerten im Rahmen der Typprüfung eine zunehmende Rolle (Kapitel 14.2.3). Hier ergeben sich Zielkonflikte bereits innerhalb der Komponente Rei-

fen, z.B. bei der gleichzeitigen Maximierung von Handlings- und Geräuscheigenschaften **(Bild 14-6)**.

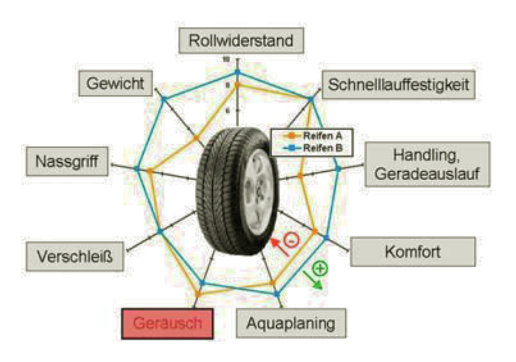


Bild 14-6: Zielkonflikte innerhalb des Systems Reifen und Fahrbahn

Der RFG-Pegel bei beschleunigter Vorbeifahrt setzt sich aus der Summe der Teilschallquellen für das Roll- und das Lastgeräusch zusammen **(Bild 14-7)**.

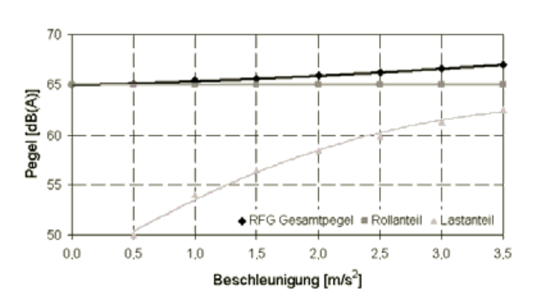


Bild 14-7: Roll- und Lastanteil des Reifen/Fahrbahn-Geräusches

Der Rollanteil des Reifengeräusches wird mit abgeschaltetem Motor ausrollend unter Vorbeifahrtbedingungen gemessen. Die auftretenden, von der Ortsabhängigkeit bereinigten Pegelmaxima L_{max} lassen sich gut über eine logarithmische Regression der Form

$$L_{\max} = a + b \cdot \log_{10}\left(\frac{v}{50 \;\; km/h}\right)$$

in ihrer Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v annähern, so dass die Beschreibung des Rollgeräusches mit den Koeffizienten a und b aussagekräftig und üblich ist **(Bild 14-8)**.

Wird zusätzlich noch die Wegabhängigkeit des Pegelverlaufes in der Vorbeifahrt berücksichtigt, so stellt sich das gemessene Rollgeräusch als Hyperfläche im dreidimensionalen Raum dar, der durch den zurückgelegten Weg s, die gefahrene Geschwindigkeit v und den zugehörigen Pegel L aufgespannt wird. Für jedes beliebige Weg-Geschwindigkeitsprofil lässt sich daraus der zugehörige Verlauf für das Rollgeräusch entnehmen.

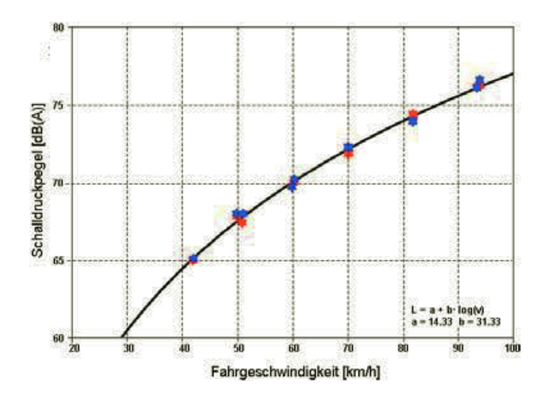


Bild 14-8: Maximaler Reifen-Schalldruckpegel beim Ausrollen, mit Regressionskurve

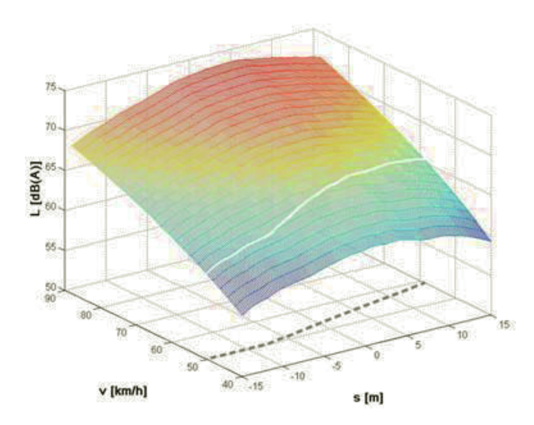


Bild 14-9: Hyperfläche des Rollgeräusch-Anteils eines Reifens mit eingetragenem Pegelverlauf für ein bestimmtes Fahrprofil

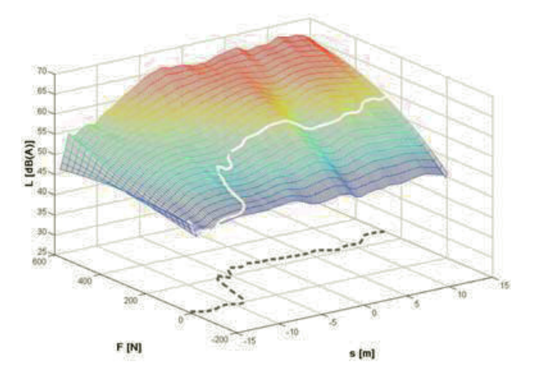


Bild 14-10: Hyperfläche des Lastgeräusch-Anteils eines Reifens mit eingetragenem Pegelverlauf für ein bestimmtes Fahrprofil

Der Lastgeräusch-Anteil lässt sich messtechnisch nicht so einfach ermitteln. Er kann aus dem gemessenen Reifengeräusch unter Last durch Subtraktion des Rollanteils bestimmt werden. Zur Messung des Reifengeräusches unter Last ist allerdings ein spezielles Reifen-Messfahrzeug mit einem Absolutschalldämpfer notwendig, um den Anteil des Antriebsgeräusches zu eliminieren. Hierbei handelt es sich um einen großvolumigen Zusatzschalldämpfer, welcher sicherstellt, dass das Ansaugmündungsgräusch und das Auspuffmündungsgeräusch unter Volllast auf Pegelwerte unter 50 dB(A) in der gesetzlichen Vorbeifahrt abgesenkt wird.

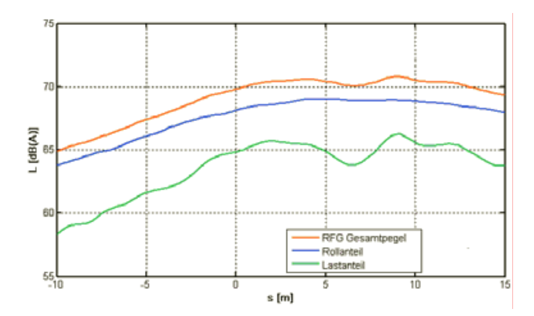


Bild 14-11: Synthese des Reifengeräusches aus Roll- und Lastanteil für ein vorgegebenes Fahrprofil

Für Reifen traten 2003 zur Begrenzung der Reifengeräusche die Regulierungen der Typprüfung 2001/43/EG in Kraft. Darin werden Grenzwerte bei 80 km/h für das Rollgeräusch in Abhängigkeit von der Reifenbreite festgelegt. Für verschiedene Reifensätze sind in **Bild 14-12** Rollgeräuschpegel über der Reifenbreite aufgetragen, zusammen mit den Grenzwerten nach 2001/43/EG und Mittelwerten der Reifenmessungen, die vor bzw. ab dem Jahr 2000 erfolgt sind. Es zeigt sich, dass die Pegel nur durch Bezug auf die Reifenbreite nicht ausreichend charakterisiert werden können. Bei breiteren Reifen werden die gültigen gesetzlichen Grenzwerte bereits heute deutlich unterschritten. Mit ca. 2dB(A) hat die Reifenindustrie seit ca. 2000 erhebliche Verbesserungen im akustischen Verhalten der Reifen erzielt.

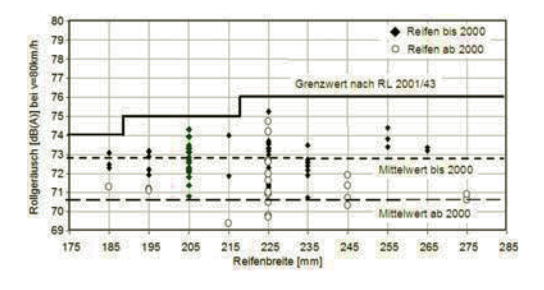


Bild 14-12: Rollgeräusch abhängig von der Reifenbreite

14.2.2 Antriebsgeräusch

Bedingt durch die intermittierende Arbeitsweise von Hubkolbenmotoren sind die Strömungsvorgänge beim Ansaugen der Frischluft und beim Ausschieben der Verbrennungsgase nicht nur durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten in den Gas führenden Bauteilen sondern auch durch hohe Druckschwankungen im Rhythmus der Zündfrequenz gekennzeichnet. Sowohl das Strömungsgeräusch als auch die Druckpulsationen werden über die Mündungen von Ansaug- und Abgasanlage als Primärschall in die Umgebung geleitet. Der Schallpegel auf der Abgasseite liegt in der beschleunigten Vorbeifahrt bis zu 20 dB über demjenigen der Ansaugseite. Er stellt damit die Hauptgeräuschquelle im Außengeräusch dar. Zur Geräuschminderung, d.h. zur Glättung der Gasdruckschwankungen, ist der Einsatz von Schalldämpfern für die Ansaug- und Abgasseite notwendig (Kapitel 10).

Ansaugseitig werden die Pegelminderungen normalerweise durch Querschnittsprünge in der Ansaugluftführung erzielt. Spektrale Dominanzen werden durch Helmholtz-Resonatoren eliminiert. Die akustische Auslegung der abgasseitigen Schalldämpfersysteme gestaltet sich dagegen oft schwierig, da eine Reihe von Zielkonflikten gelöst werden müssen. So wird aus Gründen der Motorleistung ein niedriger Abgasgegendruck und damit große Leitungsdurchmesser gefordert. Diese haben jedoch eine entsprechend geringe Einfügedämmung der Anlage zur Folge. Kompensiert werden kann dies durch größere Volumina der Anlage und/oder durch den Einsatz schaltbarer Abgasklappen. Dabei wird je nach Betriebszustand die Abgasanlage ein- oder zweiflutig durchströmt. Durch die einflutige Durchströmung der Abgasanlage bei niedrigen Drehzahlen werden die tieffrequenten Mündungsgeräusche um bis zu 10 dB und damit auf die halbe empfundene Lautstärke reduziert. Damit kann unerwünschtes Brummen im Innenraum vermieden werden. Bei höheren Geschwindigkeiten wird das zweite Rohr freigeschaltet und damit der Abgasgegendruck minimiert. Gleichzeitig reduziert der vergrößerte Querschnitt das Strömungsgeräusch.

Bei sportlichen Fahrzeugen mit leistungsstarkem Antrieb ist dessen akustische Rückmeldung durch den Mündungsschall an den Fahrer ein wichtiger Beitrag zum subjektiven Dynamikempfinden des Fahrzeugs. Zur Erfüllung der gesetzlichen Typprüfanforderungen ist der Beitrag dieser Schallquellen am Vorbeifahrmikrofon jedoch in den erforderlichen Grenzen zu halten. Hierzu wird unter Prüfbedingungen eines Außengeräuschprüfstandes der Schallanteil des Antriebsgeräusches isoliert von Reifengeräuschen und unter reproduzierbaren Fahrdynamikbedingungen gemessen. Durch Abführung der Schalldämpfermündung **(Bild 14-13)**, identifiziert man zunächst den Pegelverlauf ohne den Anteil des Mündungsgeräusches. Durch energetische Differenzbildung mit dem ursprünglichen Pegelverlauf kann daraus der Pegelbei-

trag der Schalldämpfermündung ermittelt werden **(Bild 14-14)**.



Bild 14-13: Abführung des Mündungsgeräusches in der simulierten Vorbeifahrt

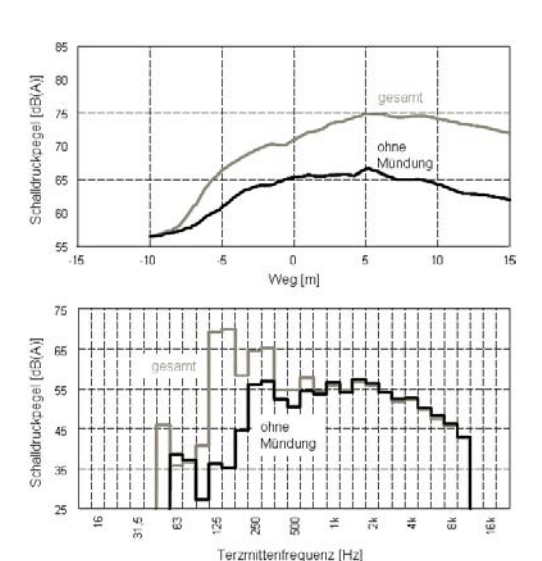


Bild 14-14: Vorbeifahrpegel und spektrale Zusammensetzung im Pegelmaximum, mit und ohne Mündungsgeräusch-Anteil

Bild 14-14 zeigt deutlich, dass bei einem sportlich ausgelegten Fahrzeug das Mündungsgeräusch in der Vorbeifahrt für den Gesamtpegel von dominierender Bedeutung ist. Spektral betrachtet ist der Anteil des Mündungsgeräusches speziell im Bereich der typischen Motorordnungen dominant, während dieses in den höherfrequenten Bereichen keinen pegelbestimmenden Beitrag leistet.

Zu einer noch weitergehenden Beitragsanalyse des Antriebsgeräusches gelangt man in einem Außengeräuschprüfstand durch die Messung der Schallpegel als Funktion der Motordrehzahl an den Vorbeifahrmikrofonen bei Hochlauf des Motors gegen den simulierten Fahrwiderstand. Richtet man dabei einen der Vorbeifahrt ähnlichen Gradienten der Motordrehzahl ein, so kann aus den gewonnen Kennfeldern ein Pegelverlauf in der Messstrecke durch „auslesen" beim Drehzahlverlauf n(s) einer Vorbeifahrt als akustische Prognose gewonnen werden **(Bild 14-15)**. Das Ergebnis eignet sich zur weitern Verrechnung mit anderen Beiträgen und gibt wesentliche Erkenntnis zur Typprüffähigkeit eines Fahrzeugs.

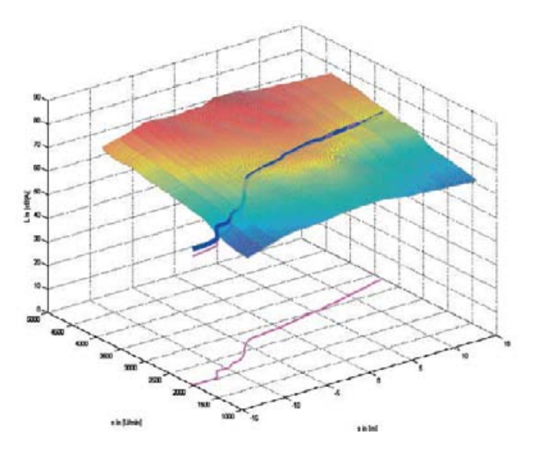


Bild 14-15: Antriebsgeräusch als Schnitt durch ein Hochlaufkennfeld in Abhängigkeit von der Motordrehzahl in der Messtrecke bei beschleunigter Vorbeifahrt

14.2.3 Vorbeifahrt nach ISO 362

Zur weiteren Reduktion der Umweltwirkungen von Geräuschemissionen hat die EU Kommission eine Umgebungslärm-Richtlinie verabschiedet. Diese sieht – vergleichbar zu der EU Luftreinhalterichtlinie – die Erstellung von Lärmkarten und gegebenenfalls die Ableitung von Maßnahmen vor. Hauptemittent der Geräuschemissionen ist der Straßenverkehr, daher sind im Planungszeitraum Maßnahmen für den Verkehrssektor zu erwarten. In diesem Zusammenhang werden derzeit die Regelungen der Außengeräusch-Typprüfung nach ECE R51 überarbeitet. Die gesetzlichen Grenzwerte in der gültigen Außengeräusch-Gesetzgebung nach ECE R51 bzw. ISO 362 wurden bereits seit 1980 schrittweise von 82 auf 74 dB(A) abgesenkt. Seit 1996 ist dieser Prozess ausgesetzt, da erkannt wurde, dass sich die dadurch bewirkte akustische Optimierung der Fahrzeuge unter den Bedingungen des realen Verkehrsgeschehens nicht mehr schlüssig lärmmindernd auswirkt. Zurzeit wird ein neues Typprüf-Verfahren (TP) formuliert. Es zielt auf eine verbesserte Abbildung der Lärmemissionen, wie sie bei Fahrzeugen im realen innerstädtischen Ver-

kehrsgeschehen auftreten. Zum bereits definierten neuen Messverfahren werden in den nächsten Jahren gesetzliche Grenzwerte erarbeitet. Erwartet werden kann die gesetzliche Einführung der neuen Typprüfregelung ab 2012 für die Zulassung neuer Fahrzeugtypen, ab 2014 für alle Neufahrzeuge. Im Rahmen einer COP-Prüfung (Conformity of Production) wird die Einhaltung der Grenzwerte vom Gesetzgeber auch in der laufenden Produktion gefordert.

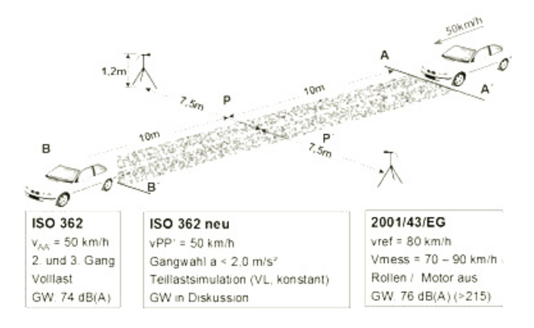


Bild 14-16: Typprüfverfahren

In der z.Z. gültigen TP – Norm werden die Vorbeifahrtpegel unter Volllast ermittelt (**Bild 14-16**). Für Fahrzeuge mit manuellen Getrieben werden Pegelwerte des zweiten und dritten Ganges arithmetisch gemittelt, während automatische Getriebe in Stufe D gemessen werden. Eine Ausnahme stellen Fahrzeuge dar, die Hochleistungskriterien erfüllen; diese werden nur im dritten Gang gemessen. In der Neufassung der TP–Norm „ISO362-neu" ist die Geräuschemission eines Fahrzeugs bei v=50 km/h unter Teillastkriterien zu ermitteln, die von dessen „power to mass – Ratio" (PMR = Leistung/Gewicht in KW/t) abhängen. Dazu erfolgen unter Auswahl geeigneter Gangstufen Vorbeifahrten am Mikrofon bei Volllast und zusätzlich Konstantfahrten in diesen Gängen. Die Mittelungsprozedur für die dabei gemessenen Pegel führt auf die Hilfspegel L_{wotref} und L_{cruise}. Aus diesen wird der Typprüfpegel L_{urban} interpoliert, der bei einer urbanen Beschleunigung a_{urban} (vom PMR abhängig, und stets kleiner 2,0 m/s^2) vorliegt. Der Algorithmus ist aus **Bild 14-17** nachvollziehbar.

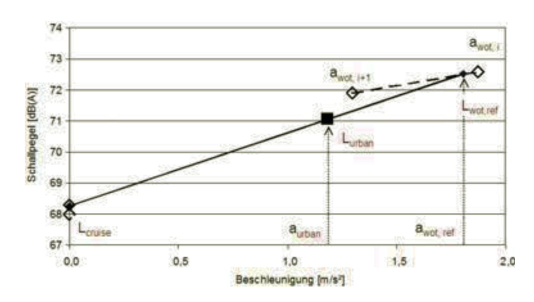


Bild 14-17: Neues Messverfahren ISO 362

Aktuelles Messverfahren

[%]	ASG	RFG
2. Gang	78	22
3. Gang	40	60

Künftiges Messverfahren

[%]	ASG	RFG
3. Gang wot	42	58
3. Gang cruise	22	78

Bild 14-18: Anteile der Teilschallquellen Antriebstrang (ASG) und Reifen (RFG) im Vergleich der Typprüfverfahren

In **Bild 14-18** werden die relativen Anteile von RFG und Motorgeräusch für ein typisches Fahrzeug abhängig vom gewählten Prüfverfahren gegenübergestellt. In den benutzten Gängen werden die Unterschiede in den Geräuschanteilen hauptsächlich von der Motordrehzahl bei Volllast geprägt, während sich im RFG das unterschiedliche Drehmoment an den Rädern wenig auswirkt. Gegenüber dem Ergebnis für das gültige Typprüfverfahren erscheint im künftigen Verfahren das RFG mit deutlich größerem Anteil. Dies entspricht der realen Belästigungssituation in urbanen Bereichen. Es bedeutet aber auch, dass weitere Absenkungen der Grenzwerte mit motorischen Maßnahmen nur noch begrenzt möglich sind.

14.3 Akustische Wahrnehmbarkeit

14.3.1 Einleitung

Während der Gesetzgeber das Sound-Design des Fahrzeug-Außengeräusches hinsichtlich der akustischen Belästigung Dritter durch die Richtlinie ISO 362 maßgeblich beeinflusst, findet ein anderer Aspekt des Fahrzeug-Außengeräusches bisher wenig Beachtung, nämlich die akustische Wahrnehmbarkeit eines Einzelfahrzeuges in einer vorhandenen Geräuschkulisse. Das ist deshalb verwunderlich, da diese für die Verkehrssicherheit, insbesondere für den Fußgängerschutz, wichtig ist. Laut Bundesamt für Statistik (2004) trugen im Jahr 2003 Sichthindernisse zu zirka 20 % aller Fußgängerunfälle bei. Da seit jeher das Ohr des Menschen der Empfänger von Warnsignalen ist, und dessen Aufgabe oft darin gesehen wird unsere Augen zu lenken, könnte durch angemessenes Sound-Design diese Zahl gesenkt werden. Angesichts der zunehmenden Popularität von Hybridfahrzeugen wird deren akustische Wahrnehmbarkeit neuerdings insbesondere in den USA stark thematisiert. Blindenverbände fürchten bereits um die Verkehrssicherheit von sehbehinderten Menschen, weil diesen bei im elektrischen Fahrmodus nahezu geräuschlos fahrenden Autos die erforderliche Orientierung fehlt. Auch Testfahrer derartiger Fahrzeuge berichten aus dem Stadtverkehr von unaufmerksamen Passanten, welche die flüsterleisen Fahrzeuge erst im letzten Moment wahrnehmen und deutliche Schreckreaktionen zeigen.

Um gute akustische Wahrnehmbarkeit zu erreichen wäre es zwar zielführend – aber keineswegs sinnvoll und wünschenswert – lautere Fahrzeuge zu bauen. Das Problem welches es zu lösen gilt besteht vielmehr darin, gute akustische Wahrnehmbarkeit sicherzustellen, ohne dabei unnötig laute oder qualitativ schlecht klingende Außengeräusche zu gestalten. In diesem Kapitel wird daher gezeigt, wie sich die akustische Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen experimentell ermitteln lässt und welche Faktoren dabei eine Rolle spielen. Außerdem wird eine instrumentelle Methode vorgestellt, die die Berechnung der akustischen Wahrnehmbarkeiten erlaubt, und damit als zusätzliches Werkzeug für das Sound-Design zur Verfügung steht.

14.3.2 Relevante Verkehrssituationen

Die akustische Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen ist vor allem für Fußgänger von Bedeutung. **Tabelle 14-1** gibt einen Überblick über mögliche Ursachen die zu Fußgängerunfällen führen und deren Häufigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2003 (Deutsches Bundesamt für Statistik, 2004). Es zeigt sich, dass falsches Verhalten beim Überschreiten der Fahrbahn (sogenannte „Überschreiten – Unfälle“) mit nahezu 78 % die Statistik der Ursachen anführt. Daher ist es sinnvoll dieser Situation in den Untersuchungen zur akustischen Wahrnehmbarkeit besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Kommt es zum Zusammenstoß Fußgänger – Kraftfahrzeug, so passiert dieser meist innerorts, eben dort, wo sich Fußgänger und Kraftfahrzeuge die Verkehrsfläche teilen. Das erklärt auch den Umstand, dass die Geschwindigkeit bei der Kollision in 91 % der Fälle geringer ist als 50 km/h. Außerdem ist der Kollisionsgegner in 70 % der Fälle ein PKW (Kühn et al., 2007). Alle hier vorgestellten Untersuchungen und Methoden werden sich daher auf diese häufige Unfallkonstellation beziehen.

Unfallursache	Anteil [%]
Mangelnde Verkehrstüchtigkeit	9,09
Falsches Verhalten beim Überschreiten der Fahrbahn	77,92
Nichtbenutzung des Gehweges	1,68
Nichtbenutzung der vorgeschriebenen Straßenseite	0,89
Spielen auf oder neben der Fahrbahn	1,36
Andere Fehler des Fußgängers	9,06

Tabelle 14-1: Häufigste Ursachen für Fußgängerunfälle in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2003 (nach Bundesamt für Statistik, 2004)

14.3.3 Psychoakustische Grundlagen

Grundlage zum Verständnis der vorgestellten Untersuchungen bildet eine psychoakustische Größe, die so genannte „Mithörschwelle“, auf welche hier vorweg eingegangen werden soll. Man stelle sich zum Beispiel das Klingeln eines Mobiltelefons vor. Dieses ist in ruhiger Umgebung gut wahrnehmbar, was manchem schon eine böse Überraschung bereitet hat. Befindet man sich allerdings in einer lauteren Umgebung, so kann derselbe Rufton unhörbar sein, obwohl dieser ohne Zweifel physikalisch vorhanden ist. Dieser Zusammenhang wird in der Psychoakustik mit sogenannten „Mithörschwellen“ beschrieben (Kapitel 7.2). Die Mithörschwelle eines Schalls, genannt Testschall, beschreibt den Schallpegel den dieser aufweisen muss, um in einem anderen Geräusch, dem Maskierer, gerade hörbar zu werden. Die Mithörschwelle wird meist in Dezibel (dB) angegeben und bildet die Grundlage für eine Vielzahl moderner Entwicklungen, die uns täglich begleiten, wie beispielsweise der Audiocodierung in Mobiltelefonen oder tragbaren Abspielgeräten.

Einen umfangreichen Überblick über Untersuchungen zu Mithörschwellen bieten Fastl und Zwicker (2007). Sie stellen nicht nur eine Vielzahl von experimentellen Ergebnissen vor, sondern geben auch ein Modell zur Berechnung von Mithörschwellen in stationären Schallen an. Dieses Modell bildet die Grundlage zur Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen. Eine auf die Bedürfnisse der Fahrzeugindustrie zugeschnittene Version ist in **Bild 14-19** dargestellt. Sie soll im Folgenden erklärt werden, für eine umfassende Beschreibung der Grundlagen sei auf Fastl und Zwicker (2007) verwiesen.

Grundlage bildet eine genormte Filterbank (DIN EN 61260, 2001), welche sowohl Maskierer $p_M(t)$ als auch Testschall $p_T(t)$ in terzbreite Frequenzbänder zerlegt und dann den Effektivwert in jedem Band berechnet. Durch Zusammenfassen der Energien in den niederfrequenten Terzbändern und zusätzlichem Einbringen von Korrekturfaktoren erhält man dann eine erste gehörgerechte Pegeldarstellung $L_{G,M}(z)$ und $L_{G,T}(z)$ in sogenannten Frequenzgruppen[1]. Die zugehörigen Spektren werden in Erregungsspektren $L_{E,M}(z)$ und $L_{E,T}(z)$ umgerechnet, welche im wesentli-

[1] Die Variable „z“ steht hier, wie in der Psychoakustik üblich, für Frequenzgruppen. Sie darf nicht mit der Frequenzdarstellung im „z-Bereich“, wie beispielsweise in der digitalen Filtertechnik üblich, verwechselt werden.



Bild 14-19: Berechnung von Mithörschwellen für stationäre Signale (nach Fastl und Zwicker, 2007).

chen die Energieverteilung auf der Basilarmembran im Innenohr des Menschen widerspiegeln. Dazu muss eine sogenannte Flankenerregung berücksichtigt werden, die dem Umstand Rechnung trägt, dass schmalbandige Signale auch Bereiche auf der Basilarmembran erregen, die eigentlich anderen benachbarten Frequenzen zugeordnet sind. Aus diesen gehörgerechten Darstellungen von Testschall und Maskierer kann dann auf die Mithörschwelle $L_{MHS}(t)$ geschlossen werden. Diese ist gegeben als der Pegel, bei dem das Erregungsspektrum des Testschalls bei einer beliebigen Frequenz das um ein Verdeckungsmaß a_v korrigierte Erregungsspektrum des Maskierers gerade erreicht und noch bei keiner anderen Frequenz übersteigt. Dabei ist das Verdeckungsmaß eine frequenzabhängige Pegelkorrektur, da tieffrequente Töne in Maskierern schwerer wahrzunehmen sind als hochfrequente.

Das vorgestellte Modell ist in der Lage, Mithörschwellen für Fahrzeugaußengeräusche mit einer hohen Genauigkeit (Fehler < 2 dB) vorherzusagen. Eigentlich kann es nur zuverlässige Vorhersagen für stationäre Schalle mit einer Dauer >200 ms liefern. Es hat sich aber gezeigt, dass das Modell auch zur Vorhersage der Mithörschwelle von sich annähernden Fahrzeugen geeignet ist, wenn man die Schalle in quasistationäre Abschnitte von 200 ms zerlegt (Kerber, 2008).

14.3.4 Experimentelle Ermittlung der akustischen Wahrnehmbarkeit

Um einen Überblick über den Ist-Stand zur akustischen Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen zu bekommen, bietet es sich an, Experimente unter kontrollierbaren Bedingungen im Labor durchzuführen. Dabei bekommen Versuchspersonen über einen Lautsprecher ein Hintergrundgeräusch vorgespielt, welchem zu zufälligen Zeitpunkten das Geräusch eines sich annähernden Fahrzeuges beigemischt wird. Immer dann, wenn die Person dieses Fahrzeuggeräusch wahrnimmt, wird sie aufgefordert dies durch Drücken eines Tasters anzuzeigen. Durch Auswerten der Zeitpunkte eines Tastendrucks kann dann auf die akustische Wahrnehmbarkeit geschlossen werden.

Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, müssen sowohl Maskierer als auch Testschalle (Fahrzeugaußengeräusche) diverse Anforderungen erfüllen. So ist es bei dieser Versuchsmethodik wichtig, dass im Maskierer keine Fahrzeugaußengeräusche zu hören sind. Diese würden von den Personen mit den Fahrzeuggeräuschen, die als Testschalle fungieren verwechselt, und somit zu ungültigen Betätigungen der Taste führen.

Auch an die Aufnahme der Fahrzeuggeräusche sind einige Anforderungen zu stellen. Da wie bereits gezeigt das Überqueren von Straßen laut Unfallstatistiken große praktische Relevanz für den Fußgängerschutz hat, ist es sinnvoll Geräusche so aufzuzeichnen, wie diese typischerweise in solchen Situation auftreten. Das Geräusch am Aufnahmemikrofon soll also gleich demjenigen sein, welches ein Fußgänger vor dem Überqueren einer Fahrbahn hört. Außengeräuschaufnahmen nach DIN ISO 362 (2005) sind dazu nicht geeignet, da sowohl die Wahl der Betriebszustände, als auch die Position der Mikrofone untypisch für die Situation „Fußgänger überquert Fahrbahn" sind. Außerdem wird bei diesen Norm-Messungen eine komplette Vorbeifahrt aufgezeichnet. Für die Unfallvermeidung ist jedoch nur das Geräusch der Anfahrt eines Fahrzeuges bis zu einer etwaigen Kollision interessant.

Für quantitative Angaben zur akustischen Wahrnehmbarkeit muss ein aussagekräftiges Maß gefunden werden. Die Mithörschwelle allein kann als solches nicht dienen, da sie ja nur den Pegel angibt, bei welchem ein Fahrzeug eben wahrnehmbar wird. Es muss allerdings ein Bezug zwischen Mithörschwelle und tatsächlich abgestrahltem Außengeräusch hergestellt werden. Im einfachsten Fall kann die Differenz zwischen dem tatsächlich abgestrahlten Außengeräuschpegel und der Mithörschwelle die akustische Wahrnehmbarkeit beschreiben. Es ergibt sich damit ein Maß in dB, welches angibt, um wie viel der Pegel des Außengeräusches den Mindestpegel, der für eine akustische Wahrnehmung notwendig ist, übersteigt.

Negative Werte sind möglich und zeigen an, dass ein Fahrzeug im Hintergrundgeräusch nicht hörbar ist.

Es hat sich gezeigt, dass es in der Praxis insbesondere Nicht-Akustikern schwer fällt, eine konkrete Vorstellung zwischen akustischer Wahrnehmbarkeit als Pegelwert und Verkehrssicherheit zu entwickeln. Daher bietet sich alternativ an, den Abstand zwischen Fußgänger und Fahrzeug im Moment des Betätigens der Taste im Experiment zu berechnen. Um dies zu ermöglichen ist es notwendig, bei der Aufzeichnung des Außengeräusches die Position des Fahrzeuges synchron zum Schall zu erfassen. Setzt man diesen Abstand dann in Relation zum Bremsweg des Fahrzeuges, so lassen sich Aussagen darüber machen, wie sicher ein Fahrzeug im untersuchten Hintergrundgeräusch akustisch wahrnehmbar ist. Da der Bremsweg wesentlich von der Reaktionszeit des Fahrers abhängig ist, lässt sich diese Einteilung weiter verfeinern. So ist ein Fahrzeug dann sicher wahrnehmbar, wenn es in einer Distanz gehört wird, die größer ist als der verlängerte Bremsweg der sich aufgrund eines unkonzentrierten Fahrers ergibt. Ein Fahrzeug wird als zu leise eingestuft, wenn es erst in einer Entfernung hörbar wird, in der der notwendige Bremsweg auch bei einem maximal schnell reagierenden Fahrer bereits überschritten ist.

Es hat sich gezeigt (Kerber, 2008), dass beide Maße für die akustische Wahrnehmbarkeit stark korreliert sind (Produktmomentkorrelation 0.85, $p < 0.0001$). Der Anwender kann daher selbst entscheiden, welche Darstellung für seinen jeweiligen Zweck die günstigere ist: die Angabe von Pegelwerten oder die Angabe von Entfernungen.

Ergebnisse zur akustischen Wahrnehmbarkeit von 35 Personenkraftwagen der Ober- und Mittelklasse sind in **Bild 14-20** dargestellt. Anfahrten mit 20, 30 und 50 km/h wurden mit einem Mikrofon mit zwei Metern Abstand von der Fahrbahnmitte aufgenommen. Als Maskierer fand die Aufnahme eines Stimmengewirrs Verwendung, welches in der Münchner Innenstadt aufgezeichnet wurde. Der energieäquivalente Dauerschallpegel dieses Hintergrundgeräusches lag bei 63.1 dB(A). Im Bild gezeigt sind jeweils Mediane und wahrscheinliche Schwankungen (25 % und 75 % Perzentile) vom Abstand des Fahrzeuges bei dessen Wahrnehmung. Zusätzlich sind als horizontale Linien die Bremswege eingezeichnet, die ein Fahrzeug bei trockener Fahrbahn (Bremsverzögerung 8 m/s²) benötigt, wenn es von einem konzentrierten (dünne Linie) oder von einem unkonzentrierten Fahrer (dicke Linie) gelenkt wird. Die Reaktionszeiten die diesen beiden Fällen zugrunde liegen sind einer Studie von Green (2000) entnommen, und betragen 0.7 bzw. 1.5 Sekunden.

Insgesamt liegt ein Großteil der untersuchten Fahrzeuge in einem Bereich, in dem eine sichere Unfall-

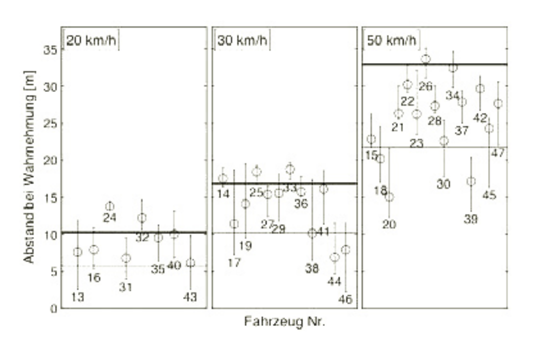


Bild 14-20: Experimentell ermittelte akustische Wahrnehmbarkeiten für 35 Fahrzeuge bei drei Geschwindigkeiten. Zusätzlich sind die Bremswege bei der jeweiligen Geschwindigkeit für konzentrierte (dünne horizontale Linie) und unkonzentrierte (dicke horizontale Linie) Fahrer gegeben. Die Nummern im Bild beziehen sich auf die Fahrzeugnummern aus Kerber (2008).

vermeidung nur dann möglich ist, wenn die Verkehrsteilnehmer konzentriert sind und entsprechend schnell reagieren. Lediglich sechs der untersuchten Fahrzeuge sind in einem Abstand wahrnehmbar, in dem es auch einem unkonzentrierten Autofahrer möglich wäre noch rechtzeitig zu bremsen; dies wird durch die Lage der Punkte oberhalb der dicken Linien angezeigt. Insgesamt zeichnen sich diese sechs Fahrzeuge dadurch aus, dass sie mit einer hohen Drehzahl betrieben werden. Dadurch werden sie nicht nur insgesamt lauter, sondern es verringert sich auch gleichzeitig deren Mithörschwelle, ein Umstand der in Kapitel 14.3.6.1 noch ausführlicher diskutiert werden soll. Bei Geschwindigkeiten ab 30 km/h ist die akustische Wahrnehmbarkeit mancher Fahrzeuge zu gering: Diese Fahrzeuge sind erst hörbar, wenn eine rechtzeitige Bremsung auch für einen aufmerksamen Fahrer unmöglich wäre, d.h. die zugehörigen Punkte liegen unterhalb der dünnen Linien in **Bild 14-20**. Eine weitere Absenkung des Fahrgeräusches in dem betrachteten Szenario muss daher aus Sicht der Fußgängersicherheit als kritisch angesehen werden, wenn nicht durch geeignete Maßnahmen gleichzeitig die notwendige akustische Wahrnehmbarkeit sichergestellt wird.

14.3.5 Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit

Um für die Bestimmung der akustischen Wahrnehmbarkeit beliebiger Fahrzeuge und Maskierer nicht jedes Mal aufwendige psychoakustische Experimente durchführen zu müssen ist es sinnvoll, ein entsprechendes Rechenmodell zu entwickeln. Die Struktur eines solchen Modells, welches auf der in Kapitel 14.3.3 vorgestellten Berechnungsmethode für Mithörschwellen stationärer Schalle aufbaut, ist in **Bild 14-21** dargestellt.

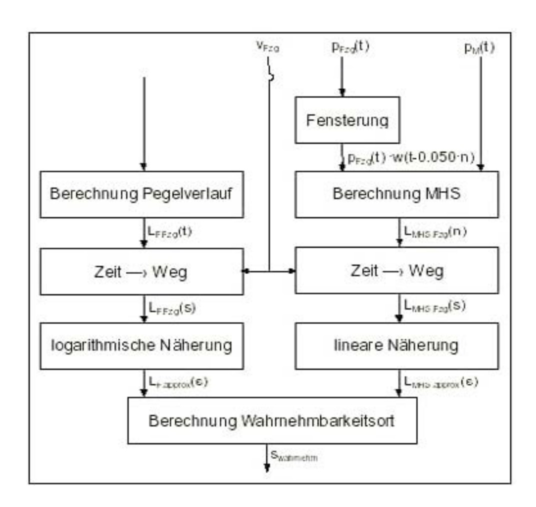


Bild 14-21: Ablauf der Berechnung zur Vorhersage der akustischen Wahrnehmbarkeit beliebiger Fahrzeuge.

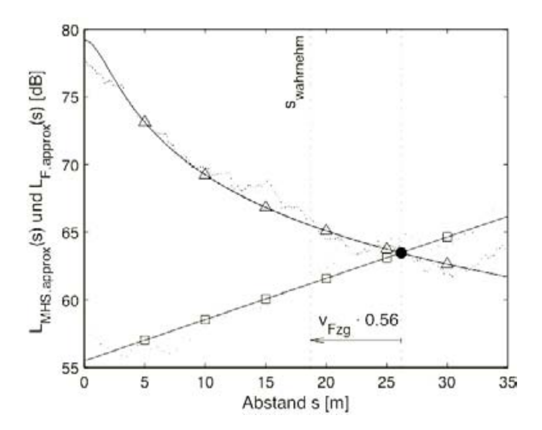


Bild 14-22: Approximierter Pegel- (Dreiecke) und Mithörschwellenverlauf (Quadrate) mit originalen Messwerten (punktiert) einer Fahrzeuganfahrt mit 50 km/h. Das Fahrzeug wird im Schnittpunkt der beiden Kurven hörbar, was eine Person im Experiment durch einen Tastendruck 0.56 Sekunden später am Ort $s_{wahrnehm}$ signalisiert.

Als Eingangsgrößen verwendet das Modell den Schalldruckzeitverlauf eines Maskierers $p_M(t)$, den Schalldruckzeitverlauf eines sich annähernden Fahrzeuges $p_{Fzg}(t)$ und dessen Geschwindigkeit v_{Fzg}. Während für den Maskierer angenommen wird, dass es sich um ein stationäres Signal handelt, wird das Fahrzeugsignal in Anteile von 200 ms, welche sich um jeweils 150 ms überlappen, zerlegt. Für jeden dieser dann quasi-stationären Anteile wird eine Mithörschwelle im Hintergrundgeräusch berechnet, was zu einer zeitabhängigen Mithörschwelle $L_{MHS,Fzg}(t)$ führt. Da die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bekannt ist, kann diese in eine ortsabhängige Mithörschwelle $L_{MHS,Fzg}(s)$ umgerechnet, und mittels einer linearen Näherung $L_{MHS,approx}(s)$ analytisch beschrieben werden.

Gleichzeitig zur Berechnung der Mithörschwellen wird für das Fahrzeug in einem zweiten Zweig des Modells der Pegelverlauf mittels eines genormten Schallpegelmessers (DIN EN 61672, 2002) mit der Zeitkonstante „fast" ermittelt. Nach Umrechnung dieses zeitabhängigen in einen ortsabhängigen Pegelverlauf $L_{F,Fzg}(s)$ kann auch dieser mittels einer logarithmischen Näherung $L_{F,approx}(s)$ analytisch dargestellt werden. **Bild 14-22** zeigt sowohl die realen, als auch die approximierten Verläufe von Mithörschwelle (Quadrate) und Pegel (Dreiecke) über dem Ort für ein Fahrzeug mit 50 km/h.

Um aus den Größen $L_{MHS,approx}(s)$ und $L_{F,approx}(s)$ schließlich die Position des Fahrzeuges bei dessen Wahrnehmung zu berechnen, muss der Schnittpunkt zwischen diesen beiden Größen gefunden werden. Der Schnittpunkt ist exakt die Position, an welcher ein Fahrzeug hörbar wird. Um diese Daten mit den Ergebnissen aus den Experimenten vergleichen zu können ist es aber noch notwendig, die mittlere Reaktionszeit der Versuchspersonen einzurechnen. Diese wurde für diese Art von Experimenten zu 0.56 Sekunden bestimmt (Kerber, 2008). Ein Vergleich zwischen experimentell ermittelten und berechneten Abständen bei Wahrnehmung zeigt **Bild 14-23**.

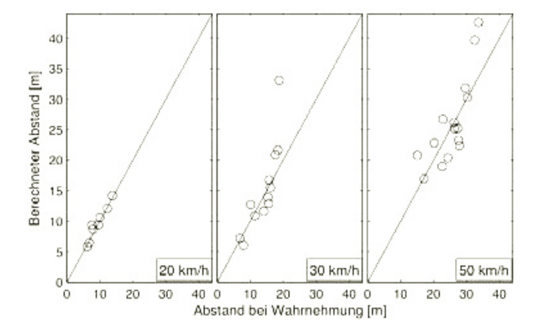


Bild 14-23: Vergleich zwischen experimentell ermitteltem und berechnetem Abstand bei akustischer Wahrnehmung für 35 Fahrzeuge bei drei Geschwindigkeiten. Die Produktmomentkorrelationen ergeben sich zu 0.965 (20 km/h), 0.823 (30 km/h) und 0.799 (50 km/h) und sind alle signifikant auf einem 0.1 % Niveau.

Die Korrelationen zwischen experimentell ermittelten und berechneten Abständen sind groß und alle hochsignifikant auf einem 0.1 % Niveau. So bewegen sich die Produktmomentkorrelationen in einem Bereich

zwischen 0.799 und 0.965. Ein direkter Vergleich zwischen Experiment und Berechnungen zeigt, dass 27 der 35 Werte innerhalb der wahrscheinlichen Schwankungen des Experiments liegen. Für höhere Geschwindigkeiten werden die Vorhersagen etwas schlechter. Dies lässt sich durch die Bedingungen bei den Aufnahmen der Fahrzeugaußengeräusche erklären: Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Abstände bei Wahrnehmung allgemein größer. Da die Aufnahmen der Außengeräusche im Freien stattgefunden haben, sind unweigerlich Störgeräusche vorhanden, die in den Aufnahmen umso dominanter werden, je weiter das Fahrzeug vom Mikrofon entfernt ist. Da die Berechnung, anders als der Mensch, nicht zwischen Fahrzeug- und Störgeräusch unterscheiden kann, führt dies für diese Fälle zu einer Verschlechterung der Mithörschwellenberechnung. Diese spiegelt sich für höhere Geschwindigkeiten in einer insgesamt schlechteren Qualität der Vorhersagen wider.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das Modell geeignet ist die akustische Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen mit großer Genauigkeit vorherzusagen. Damit steht dem Sound-Designer ein weiteres Werkzeug zur Verfügung, welches es ermöglicht für zukünftige Fahrzeuggenerationen auch deren akustische Wahrnehmbarkeit im Designprozess mit zu berücksichtigen.

14.3.6 Beeinflussung durch andere Faktoren

Bisher wurden nur Laboruntersuchungen vorgestellt, die sich mit der akustischen Wahrnehmbarkeit von verschiedenen Fahrzeugaußengeräuschen befassten. Dabei wurde bewusst darauf verzichtet, weitere speziellere Einflussfaktoren zu beschreiben. Daher werden hier abschließend noch näher die Einflüsse der Gangwahl sowie zusätzliche weitere Faktoren vorgestellt.

14.3.6.1 Gangwahl

Die akustische Wahrnehmbarkeit eines Fahrzeuges hängt, wie bereits angemerkt, stark vom Betriebszustand und damit von der Gangwahl beim Fahren ab. **Bild 14-24** zeigt die Abhängigkeiten der Mithörschwelle und des Schalldruckpegels für stationäre Fahrzeuggeräusche in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Gangwahl.

Bei vorgegebenem Gang erhöht sich mit steigender Geschwindigkeit nicht nur – wie zu erwarten – der abgestrahlte Außengeräuschpegel, sondern es sinkt auch die Mithörschwelle. Dieses Absinken lässt sich dadurch erklären, dass der spektrale Schwerpunkt des Außengeräusches durch die höhere Drehzahl zu höheren Frequenzen hin verschoben wird. Dort weisen jedoch übliche Hintergrundgeräusche weniger Energie auf, deren maskierende Wirkung ist dadurch geringer.

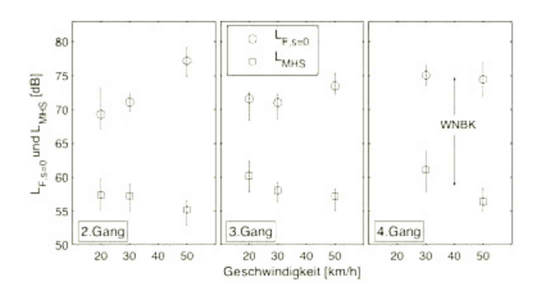


Bild 14-24: Mittlerer Einfluss der Gangwahl auf die Mithörschwelle L_{MHS} (Quadrate) und Außengeräuschpegel $L_{F,s=0}$ (Kreise) für mehrere Fahrzeuge bei verschiedenen Geschwindigkeiten in den Gängen zwei (links), drei (mitte) und vier (rechts). Hintergrundgeräusch war hier ein Rosa-Rauschen mit 66.2 dB. Außerdem ist die Differenz WNBK zwischen Außengeräuschpegel und Mithörschwelle als Maß für die Wahrnehmbarkeit angedeutet.

Insgesamt führt die Kombination dieser beiden Effekte zu einer verbesserten akustischen Wahrnehmbarkeit mit größer werdender Geschwindigkeit, wie das aus der größer werdenden Differenz aus Außengeräuschpegel und Mithörschwelle ersichtlich ist. Diese verbesserte Wahrnehmbarkeit wird bei unvernünftiger Fahrweise (50 km/h im zweiten Gang) hauptsächlich mit einem erhöhten Außengeräuschpegel, und damit erhöhter Lärmbelastung erkauft. Bei vernünftigerer Fahrweise (50 km/h im vierten Gang), ergibt sich die verbesserte akustische Wahrnehmbarkeit dagegen aufgrund der Verringerung der Mithörschwelle. Diese Fahrweise verbessert demnach nicht nur den Kraftstoffverbrauch, sondern erhöht auch die Wahrnehmbarkeit ohne unnötig Lärm zu erzeugen.

14.3.6.2 Ablenkung

Fußgänger, die sich im Straßenverkehr bewegen, sind üblicherweise nicht ausschließlich damit befasst, auf ihre akustische Umgebung zu achten. Vielmehr führen sie eine Menge anderer Tätigkeiten aus, die sie vom Verkehrsgeschehen ablenken. Es ist daher wünschenswert, den Einfluss von Ablenkung auf die Mithörschwelle im Laborexperiment zu erfassen.

Bei Beobachtungen im Stadtgebiet München wurde herausgefunden, dass die häufigste Form der Ablenkung die Konversation zwischen zwei Fußgängern ist. Daher wurde eine solche Situation im Labor nachgestellt. Dabei mussten sich Versuchspersonen, während sie in einem Hintergrundgeräusch verschiedene Fahrzeuge hören sollten, Zahlenkombinationen merken und diese in der richtigen Reihenfolge wiederholen. Gleichzeitig mussten sie immer beim Hören eines Fahrzeuges einen Taster betätigen, woraus dann dessen Mithörschwelle bestimmt wurde. Die Ergebnisse dieser Mithörschwellenbestimmung mit bzw. ohne Ablenkung sind in **Bild 14-25** dargestellt.

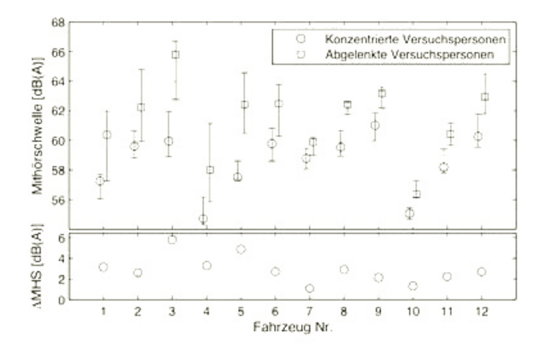


Bild 14-25: Mithörschwellen für 12 Fahrzeuge gemessen mit konzentrierten (Kreise) und unkonzentrierten (Quadrate) Versuchspersonen. Zusätzlich sind im unteren Teil der Grafik die Differenzen ΔMHS zwischen den Mithörschwellen für die beiden Situationen dargestellt.

Die Mithörschwellen für die untersuchten Fahrzeuge erhöhen sich um 1 bis 6 dB(A). Im Mittel wird die Wahrnehmbarkeit bei abgelenkten Personen um 2.7 dB(A) schlechter. Die Unterschiede sind für alle Fahrzeuge mit Ausnahme von Fahrzeug 7 und 12 signifikant auf einem 5 % Niveau (t-Test für gepaarte Stichproben).

Es zeigt sich also, dass die Ablenkung einer Person ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die akustische Wahrnehmbarkeit hat. Die Größenordnung der Unterschiede liegt hier für manche Konfigurationen im Bereich des Einflusses der Gangwahl.

14.3.6.3 Binaurale Faktoren

Der Mensch besitzt von Natur aus zwei Ohren, was ihm nicht nur ermöglicht die Richtung von Schallen mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, sondern auch die Mithörschwellen von Signalen wesentlich beeinflusst. Durch Vergleich der Signale an den beiden Ohren, welche zeitverzögert und mit unterschiedlichen Pegeln von einer Quelle dort eintreffen, kann sich die Mithörschwelle drastisch verringern (Zwicker und Fastl, 2007). Dieser Effekt wird in der Literatur üblicherweise als „binaural masking level difference“ bezeichnet und hat je nach räumlicher Konfiguration von Maskierer und Testschall Verringerungen von Mithörschwellen im Bereich von 0 bis 15 dB zur Folge.

Durch die Verwendung von binauralen Techniken (Kunstkopfaufnahmen und Kopfhörerwiedergabe ggf. mit Headtracking) in den beschriebenen Versuchen sollte es auch möglich werden, Untersuchungen mit Maskierern durchzuführen, die bereits Fahrzeugaußengeräusche enthalten. Das ist möglich, da die räumliche Position der einzelnen Fahrzeuganfahrten klar hörbar bleibt, und es den Versuchspersonen ermöglicht, auf eine Fahrzeuganfahrt aus einer konkreten Richtung zu reagieren. Hintergrundgeräusche welche Fahrzeuge enthalten spielen eine bedeutende Rolle in einer Vielzahl von urbanen Geräuschkulissen, die auch üblicherweise lauter sind als das zuvor beschriebene und untersuchte Stimmengewirr. Es wäre daher interessant zu sehen, wie sich die akustischen Wahrnehmbarkeiten insgesamt zusammen mit den verringerten „binauralen Mithörschwellen“ entwickeln.

Literatur

[1] Patsouras, Ch.; Fastl, H.; Patsouras, D.; Pfaffelhuber, K.: How far is the sound quality of a diesel powered car away from that of a gasoline powered one? Proc. FORUM ACUSTICUM Sevilla 2002

[2] Fastl H., Zwicker E. (2007): *Psychoacoustics. Facts and Models.* 3rd Edition, Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

[3] Deutsches Bundesamt für Statistik (2004): *Statistisches Jahrbuch 2004.*

[4] DIN EN 61260 (2001): *Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven.* Deutsche Industrie Norm.

[5] DIN EN 61672 (2002): *Elektroakustik: Schallpegelmesser. Teil 1: Anforderungen.* Deutsche Indus-
trie Norm.

[6] DIN ISO 362 (2005): *Akustik-Messverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch. Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N.* Deutsche Industrie Norm.

[7] Green M. (2000): *„How long does it take to stop?“ Methodological analysis of driver perception-brake times.* Transportation human factors, 2: 195–216.

[8] Kerber S. (2008): *Wahrnehmbarkeit von Fahrzeugaußengeräuschen in Hintergrundgeräuschen: Psychoakustische Beurteilungen und modellbasierte Prognosen.* Verlag Dr. Hut, München.

[9] Kühn M., Fröming R., Schindler V. (2007): *Fußgängerschutz. Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren.* Springer Berlin Heidelberg New York.

[10] Patsouras Ch., Filippou T., Fastl H., Patsouras D., Pfaffelhuber K. (2002): *Semantisches Differential versus psychoakustische Empfindungsgrößen bei Außenstandsgeräuschen von Fahrzeugen der oberen Mittelklasse.* In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2002. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin.